

基于突变级数法的半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土保持综合效益研究

焦金鱼¹, 贵立德², 何启明¹, 杨 东³

(1 定西师范高等专科学校 地理系, 甘肃 定西 743000; 2 定西市水土保持科学研究所, 甘肃 定西 743000;

3 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

[摘要] 【目的】利用突变理论与模糊数学相结合产生的突变模糊隶属函数, 研究半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土保持综合效益的多目标评价问题。【方法】运用突变级数法, 将小流域水土保持综合效益按照突变理论的要求进行多层次矛盾分解, 从保水保土的基础效益、经济效益、生态效益、社会效益 4 个方面构建了 16 项评价指标, 对半干旱黄土丘陵沟壑区安家坡小流域的水土保持综合效益进行了评价。【结果】安家坡小流域水土保持综合效益从 20 世纪 60 年代到 90 年代有 2 个明显的增长期, 2000 年以后发展平稳, 该小流域的生态经济环境步入良性循环状态。【结论】安家坡小流域水土保持综合突变指数随时间呈波动式上升趋势, 与实地调研结果相符。实例评价结果表明, 突变级数法是合理、客观而可行的, 其为解决半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土保持综合效益多目标评价问题提供了一种新思路。

[关键词] 突变级数法; 小流域; 水土保持; 效益评价

[中图分类号] S157

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)01-0171-08

Study on comprehensive benefits of soil and water conservation of small watershed in semi-arid loess hilly region based on catastrophe progression method

JIAO Jin-yu¹, GUI Li-de², HE Qi-ming¹, YANG Dong³

(1 Department of Geography, Dingxi Teachers' College, Dingxi, Gansu 743000, China; 2 Institute of Soil and Water

Conservation of Dingxi City, Dingxi, Gansu 743000, China; 3 College of Geography and Environmental Sciences,

Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: 【Objective】Catastrophe fuzzy membership function produced by combination of catastrophe and fuzzy mathematics theory was used to study problems about integrated multi-objective evaluation of soil and water conservation effectiveness of small watershed in semi-arid loess hilly region. 【Method】Catastrophe progression method was used to decompose contradictory multi-objective level of the small watershed comprehensive benefits in accordance with the requirements of catastrophe theory. This study evaluated comprehensive benefit of soil and water conservation of small Anjiapo watershed in semi-arid loess hilly region with 16 evaluating factors selected from 4 aspects on the basis of effectiveness, economic efficiency, ecological benefits and social benefits. 【Result】Anjiapo small watershed comprehensive benefit from 1960 to 1990 has two distinct growth periods, growing steadily since 2000. Ecological and economic environment of small watershed has entered into a virtuous circle simultaneously. 【Conclusion】Integrated catastrophe index of Anjiapo watershed soil and water conservation showed a fluctuated increase. The conclu-

* [收稿日期] 2010-06-18

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40599424, 40473006); 甘肃省教育厅高校社科项目“西部县域经济发展研究”(0619B-01)

[作者简介] 焦金鱼(1974—), 男, 甘肃通渭人, 讲师, 硕士, 主要从事区域环境与水土保持研究。E-mail: jiaojinyu2006@163.com

sion is consistent with the field survey. Examples showed that the progression method is reasonable, objective and feasible. It provides a new idea to solve multi-objective evaluation on soil and water conservation comprehensive benefits of small watershed in semi-arid loess hilly region.

Key words: catastrophe progression method; small watershed; water and soil conservation; evaluation

黄土丘陵沟壑区由不同层次和规模不等的小流域组成,而小流域是黄土丘陵沟壑区地理、经济、社会相对独立的基本单元。从生态经济学角度看,流域是生态经济活动的基础,是一个开放、复杂的巨系统^[1]。流域生态经济的良性循环是流域复合系统健康发展的基本特征。自 20 世纪 80 年代以来,我国水土保持工作进入了一个以小流域为单元进行治理的崭新阶段。我国水土保持的长期经验证明,在半干旱黄土丘陵沟壑区以小流域为单位开展的水土保持治理工作,是防治水土流失的最佳形式^[2],也是发展流域经济、快步治穷致富的必由之路。

由于小流域是一个多层次、多方位、多约束、多功能的自然生态经济复合系统,通过各种植物及工程措施治理后的流域系统,势必会与经济社会系统之间进行物质、能量和信息方面的流动。参考《水土保持综合治理效益计算方法》(GB/T 15774—1995),可将水土保持综合效益划分为保水保土的基础效益、经济效益、生态效益、社会效益 4 个方面。因此,对小流域水土流失治理综合效益的分析与评价,实质上就是一个多因素、多目标、多指标综合效果的系统评价问题。目前,虽然已有研究者利用许多单一方法进行了流域效益的评价分析,但这些分析方法中导致评价结果出现系统误差的因素较多,尤其是缺乏系统评价的最优标准^[3],故本研究利用突变理论与模糊数学相结合产生的突变模糊隶属函数^[4],对甘肃定西市安家坡流域的水土保持综合效益进行分析,旨在为半干旱黄土丘陵沟壑区小流域的水土保持综合效益评价提供参考。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安家坡流域,是黄河流域祖厉河水系的一条小支沟,位于 $104^{\circ}38'13''\sim 104^{\circ}40'25''E, 35^{\circ}33'02''\sim 35^{\circ}35'29''N$,海拔 1 900~2 250 m,距定西县城东约 3 km,流域面积 10.06 km²,按水土保持区划该区属于黄土丘陵沟壑区第五副区,按气候区划属中温带半干旱气候区。该区年均气温 6.3 ℃,年均 ≥ 10 ℃的活动积温 2 239.1 ℃,极端最高、最低气温分别为 34.3 和 -27.1 ℃;年均降水量 427 mm,但时空分布极不均匀,主要集

中在 7—9 月,在植物生长需水期严重缺水;年日照时数 2 409 h,有效生理辐射 49%,无霜期 141 d,蒸发量 1 510 mm;流域内有大小沟壑 42 条,沟道深 30~50 m,沟谷断面呈“V”型,沟壑密度 3.14 km/km²,土壤主要为黄绵土,有机质含量 3.7~13.4 g/kg,0~200 cm 土层土壤体积质量平均值为 1.2 g/cm³。该流域按植被区划属于森林草原带干旱草原区,全流域共有野生植物 23 科 79 种,栽培植物 23 科 64 种。由于干旱缺水、植被稀少,该区植被以多年生禾本科、菊科、豆科植物为主,加之当地群众对生态植被的干扰与破坏,该流域水土流失十分严重。

2 突变级数法评价的基本原理

作为一门以突变现象为研究对象的系统理论,突变理论被广泛应用到许多学科中。其中一种常见的应用,是利用突变级数法来解决多准则决策问题。突变级数法的主要特点是其首先对系统的评价总目标进行多层次矛盾分解,利用突变理论与模糊数学相结合产生的突变模糊隶属函数,由归一公式进行综合量化运算,最后归为一个参数,即求出总的隶属函数,从而进行评价。评价指标确定后,可根据经验(定性)确定各指标的重要性,在同一属性、同一层次的指标中,重要程度相对大的指标排在前面,相对次要的指标排在后面,这样就解决了确定权重的困难。由于一般突变系统的控制变量不超过 4 个,所以相应的底层指标(相当于控制变量)也不应超过 4 个,因而用该方法处理模糊数学的多目标评价决策问题,较用模糊数学方法更为适宜和准确。

2.1 由突变模型的分歧集方程推导出归一公式

基于突变理论的多准则评价方法,汲取了现有层次分析法、效用函数法和模糊评价法的优点,通过对分歧集的归一化处理,得到了一种突变模糊隶属度函数,应用这种评价法时无需确定各因素的权重,但对各因素之间的矛盾主次关系应有较好的把握。

对 3 种常用突变模型的分歧集,写成分解形式如下:

$$\text{尖点突变: } a = -6x^2, b = 8x^3; \quad (1)$$

$$\text{燕尾突变: } a = -6x^2, b = 8x^3, c = -3x^4; \quad (2)$$

$$\text{蝴蝶突变: } a = -10x^2, b = 20x^3, c = -15x^4, d =$$

$$4x^5; \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 分别为突变模型的控制变量, x 为突变模型的状态变量。为了便于利用其他评价方法(如效用函数法、模糊隶属度函数)的资料,可将上述分歧集方程进行归一化处理,得到类似于模糊隶属度函数的突变模糊隶属度函数。

以尖点突变为例,分解形式的分歧集方程可改写为:

$$x_a = \sqrt{\frac{a}{-6}}, \quad (4)$$

$$x_b = \sqrt[3]{\frac{b}{8}}. \quad (5)$$

式中: x_a 、 x_b 是对应于 a 、 b 的 x 值。

如果令 $|x|=1$,则有 $a=-6$ 与 $b=8$,这样就确定了评价决策时状态变量 x 和控制变量 a 、 b 的取值范围。其绝对值为: x 为 $0\sim 1$, a 为 $0\sim 6$, b 为 $0\sim 8$ 。但这样的 x 、 a 、 b 取值并不统一。为了实际运算方便,并且便于利用其他评价方法的已有资料,可将状态变量和控制变量取值为 $0\sim 1$ 。为此,只要将 a 缩小6倍, b 缩小8倍即可(缩小相对范围的方法,不影响突变模型的性质)。

由此可得到尖点突变模型的归一化公式为:

$$x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

将燕尾突变和蝴蝶突变用同样方法进行处理,可得其归一化公式为:

$$\text{燕尾突变: } x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}, x_c = c^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

$$\text{蝴蝶突变: } x_a = a^{\frac{1}{2}}, x_b = b^{\frac{1}{3}}, x_c = c^{\frac{1}{4}}, x_d = d^{\frac{1}{5}}. \quad (8)$$

经过归一化处理,状态变量和控制变量的取值均为 $0\sim 1$,将其称为突变模糊隶属度函数,这是突变多准则评价方法的核心^[5-7]。

2.2 取值原则和评价准则

突变模糊隶属度函数一般采用取值“越大越好”的原则。实际应用时如有不同的准则函数,也可以通过变换取得这种函数。

(1)非互补准则。一个系统的诸控制变量之间,其作用不可互相替代,在不能相互弥补其不足时,按“大中取小”的原则取值,即从诸控制变量(u 、 v 、 w 、 t)相应的突变级数值中,选取最小值作为系统的 x 值,即:

$$x = \min\{x_u, x_v, x_w, x_t\}. \quad (9)$$

(2)互补准则。当诸控制变量(u 、 v 、 w 、 t)之间可相互弥补其不足时, x 取其均值,即:

$$x = \{x_u, x_v, x_w, x_t\} / 4. \quad (10)$$

只有遵循上述原则,才能满足突变理论中分歧

点集方程的要求。

3 评价指标体系的建立

3.1 评价指标的选取原则

根据研究流域的主要特征、流域治理目标以及综合效益评价目的,评价指标体系应能全面、真实和定量地反映流域治理前后综合效益的变化程度,其指标选取原则如下^[8-10]。

3.1.1 系统协调性原则 定西黄土丘陵沟壑区东北低山丘陵属典型的生态脆弱区,其小流域的土地与人口、经济、社会、生态环境构成了协调统一而又脆弱的整体,选取的指标要能综合地反映影响小流域综合治理的各种因素。

3.1.2 科学性原则 指标体系必须建立在科学的基础上,统计计算方法规范,指标概念明确,且具有一定的科学内涵,能够充分度量 and 反映区域复合系统的发展程度,以保证评价结果的真实性和客观性。

3.1.3 层次性原则 由于诊断对象——小流域是一个复杂的巨系统,它可分解为若干较小的亚系统,因此小流域水土保持综合效益评价指标体系通常由目标层、准则层、指标层等构成。越往上,指标越综合,越往下,指标越具体。

3.1.4 易得性原则 评价指标是进行评价的基础资料,如果一个指标无法用具体数据来表征,那么这个指标再优也没有意义,所以要选择可操作性强、基础数据易获得的指标。

3.1.5 综合完备性原则 要求指标体系覆盖面较广,能全面反映影响小流域综合治理和健康持续发展的各种因素。同时,在指标筛选过程中应尽量选取带有共性的代表性指标,且尽量用处理后的组合指标,而应少使用单一指标。

3.2 评价指标体系的建立

本研究按照上述评价指标的选取原则,参考压力-状态-响应(PSR)模型^[11]和相关领域多位专家的建议,以及有关的研究成果^[12-17],结合该流域生态特征,根据研究流域干旱缺水、植被覆盖率低、水土流失严重、生态环境脆弱、居民生活水平较低等实际情况,从保水保土的基础效益、经济效益、生态效益、社会效益4个方面,初步选择了土壤侵蚀模数(C_1)、减沙率(C_2)、农田降水利用率(C_3)、水土流失总治理度(C_4)、粮食单产(C_5)、农业总产值(C_6)、工副业贡献率(C_7)、人均牲畜占有量(C_8)、恩格尔系数(C_9)、人口密度(C_{10})、非农比重(C_{11})、耕地利用率(C_{12})、人均耕地(C_{13})、梯田比(C_{14})、林草覆盖率(C_{15})、人畜饮水

环境容量(C_{16})共 16 项指标,分 3 个层次构建了黄土丘陵沟壑区安家坡小流域水土保持综合效益评价指标体系,选用蝴蝶突变模型进行分析,并根据权重大小对各指标进行了重要性排序,结果如表 1 所示。

3.3 数据来源及处理

本研究的一部分数据来源于 1990—2007 年《定

西年鉴》和文献[12-13],另一部分数据来源于甘肃定西市水土保持科学研究所以及实地调查。对本研究所采用的 16 项评价指标,首先利用熵值法求各指标的权重,然后利用多目标模糊优选模型计算各层的决策优属度。

表 1 甘肃定西市安家坡小流域水土保持综合效益评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for benefit of soil and water conservation of Anjiapo small watershed of Dingxi city, Gansu province

| 一级指标 First-level index | 重要性排序 Important sequence | 二级指标 Secondary Index | 重要性排序 Important sequence |
|---|-----------------------------|--|-----------------------------|
| B_1 基础效益 B_1 Basic benefit | 4 | C_1 土壤侵蚀模数/($t \cdot km^{-2} \cdot 年^{-1}$) Soil erosion modulus | 3 |
| | | C_2 减沙率/% Sediment reduction rate | 4 |
| | | C_3 农田降水利用率/% Precipitation utilization of farmland | 1 |
| | | C_4 水土流失总治理度/% The total degree of soil erosion control | 2 |
| B_2 经济效益 B_2 Economic benefits | 2 | C_5 粮食单产/($kg \cdot hm^{-2}$) Grain yield | 4 |
| | | C_6 农业总产值/元 Agricultural output(CNY) | 2 |
| | | C_7 工副业贡献率/% Industry and sideline contribution rate | 3 |
| | | C_8 人均牲畜占有量/(以羊为单位) Possession of livestock per capita | 1 |
| B_3 社会效益 B_3 Social benefits | 3 | C_9 恩格尔系数/% Engel coefficient | 2 |
| | | C_{10} 人口密度/($人 \cdot km^{-2}$) Population density | 1 |
| | | C_{11} 非农比重/% The proportion of non-agricultural | 4 |
| | | C_{12} 耕地利用率/% Land utilization | 3 |
| B_4 生态效益 B_4 Ecological benefits | 1 | C_{13} 人均耕地/($hm^{-2} \cdot 人$) Per capita cultivated land | 1 |
| | | C_{14} 梯田比/% Proportion of terrace | 4 |
| | | C_{15} 林草覆盖率/% Vegetation coverage | 2 |
| | | C_{16} 人畜饮水环境容量/($人 \cdot km^{-2}$) Environmental capacity of drinking water | 3 |

3.4 指标的无量纲化

采用极差正规化法,对第 i 个评价指标的 X_i 值进行极差正规化处理,即将越大越好型指标 X_i 变换为: $X_i = (X_i - \min X_i) / (\max X_i - \min X_i)$,将越小越

好型指标变换成 $X_i = (\max X_i - X_i) / (\max X_i - \min X_i)$,其中 $i = 1, 2, \dots, m$ 。通过变换以后, $0 \leq X_i \leq 1$,这样就可以消除量纲对评价结果的影响。各突变因子经过无量纲化处理后的结果见表 2。

表 2 甘肃定西市安家坡小流域不同时段评价指标的无量纲化

Table 2 Standardized index at different times for Anjiapo small watershed in Dingxi city, Gansu province

| 指标 Index | 1960— 1970 | 1971— 1980 | 1981— 1990 | 1991— 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| C_1 | 0.000 0 | 0.178 5 | 0.707 3 | 0.811 2 | 0.865 8 | 0.881 0 | 0.923 4 | 0.934 4 | 0.987 4 | 1.000 0 | 0.979 4 |
| C_2 | 0.000 0 | 0.598 4 | 0.909 8 | 0.535 5 | 0.980 9 | 0.991 8 | 0.994 5 | 1.000 0 | 1.000 0 | 0.972 7 | 0.967 2 |
| C_3 | 0.000 0 | 0.051 8 | 0.059 9 | 0.299 7 | 0.515 0 | 0.566 8 | 0.836 5 | 1.000 0 | 0.899 2 | 0.833 8 | 0.703 0 |
| C_4 | 0.000 0 | 0.208 5 | 0.424 8 | 0.726 7 | 0.801 8 | 0.812 1 | 0.846 3 | 0.880 3 | 0.914 3 | 0.948 3 | 1.000 0 |
| C_5 | 0.000 0 | 0.086 8 | 0.219 1 | 0.325 1 | 0.925 8 | 0.900 0 | 1.000 0 | 0.715 9 | 0.810 2 | 0.611 3 | 0.773 0 |
| C_6 | 0.000 0 | 0.009 3 | 0.045 7 | 0.334 7 | 0.586 2 | 0.594 8 | 0.594 8 | 0.811 4 | 0.973 0 | 0.973 0 | 1.000 0 |
| C_7 | 0.000 0 | 0.003 1 | 0.093 3 | 0.422 9 | 0.678 4 | 0.758 3 | 0.876 6 | 0.894 6 | 0.918 3 | 0.927 3 | 1.000 0 |
| C_8 | 0.326 3 | 0.263 2 | 0.757 9 | 1.000 0 | 0.000 0 | 0.663 2 | 0.368 4 | 0.200 0 | 0.136 8 | 0.084 2 | 0.178 9 |
| C_9 | 0.000 0 | 0.118 4 | 0.345 1 | 0.575 8 | 0.661 2 | 0.712 8 | 0.789 5 | 0.846 7 | 0.894 1 | 0.983 3 | 1.000 0 |
| C_{10} | 1.000 0 | 0.602 7 | 0.495 2 | 0.104 3 | 0.043 4 | 0.034 7 | 0.026 0 | 0.017 4 | 0.010 9 | 0.000 0 | 0.050 0 |
| C_{11} | 0.000 0 | 0.268 4 | 0.517 4 | 0.425 3 | 0.538 4 | 0.674 6 | 0.811 3 | 0.853 2 | 0.925 8 | 0.975 1 | 1.000 0 |
| C_{12} | 0.443 3 | 0.000 0 | 0.016 7 | 0.736 7 | 0.843 3 | 0.856 7 | 0.893 3 | 0.923 3 | 0.950 0 | 0.973 3 | 1.000 0 |
| C_{13} | 0.000 0 | 0.520 0 | 0.680 0 | 0.880 0 | 0.920 0 | 0.920 0 | 0.920 0 | 1.000 0 | 1.000 0 | 1.000 0 | 1.000 0 |
| C_{14} | 0.000 0 | 0.338 5 | 0.607 5 | 0.778 4 | 0.869 3 | 0.885 3 | 0.901 7 | 0.918 4 | 0.935 5 | 0.953 0 | 1.000 0 |
| C_{15} | 0.274 6 | 0.021 1 | 0.000 0 | 0.504 2 | 0.638 9 | 0.661 2 | 0.735 4 | 0.809 1 | 0.882 8 | 0.956 2 | 1.000 0 |
| C_{16} | 0.000 0 | 0.066 7 | 0.314 5 | 0.425 4 | 0.512 4 | 0.591 6 | 0.621 5 | 0.784 2 | 0.876 4 | 0.975 4 | 1.000 0 |

3.5 权重的熵值法确定

熵值法是在客观条件下,由各评价指标的监测值构成的判断矩阵来确定各指标权重的方法,其通过数据本身所反映的信息无序化效用值来计算权重系数,由于尽量避免各因子权重的主观性,因而评价结果更能反映实际情况^[18]。采用熵值法确定权重的具体计算步骤如下。

设有 m 个评价对象和 n 个评价指标,由其形成的原始指标数据矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{m \times n}$, 矩阵 \mathbf{R} 中每列元素的最优值为 r^* , 对该矩阵的所有元素进行标准化处理,可得:

$$d_{ij}=r_{ij}/r^*。(i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)。(11)$$

式中: d_{ij} 为无量纲化值, r_{ij} 为评价指标, r^* 为所有评价指标中的最优值, i 为某个具体的评价对象, j 为某个具体的评价指标。

表 3 甘肃定西市安家坡小流域水土保持综合效益评价指标的熵值及权重值

Table 3 Entropies and weights of the indicators of the evaluation for benefit of soil and water conservation of Anjiapo small watershed of Dingxi city Gansu province

| 指标 Index | 熵值 (e_j) Entropies | 权重 (θ_j) Weights | 指标 Index | 熵值 (e_j) Entropies | 权重 (θ_j) Weights | 指标 Index | 熵值 (e_j) Entropies | 权重 (θ_j) Weights | 指标 Index | 熵值 (e_j) Entropies | 权重 (θ_j) Weights |
|-------------|------------------------------|---------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------------|-------------|------------------------------|---------------------------------|
| C_1 | 0.937 9 | 0.024 3 | C_5 | 0.902 1 | 0.038 3 | C_9 | 0.921 3 | 0.030 8 | C_{13} | 0.096 6 | 0.353 0 |
| C_2 | 0.952 2 | 0.018 7 | C_6 | 0.861 8 | 0.054 0 | C_{10} | 0.625 8 | 0.146 2 | C_{14} | 0.946 8 | 0.020 8 |
| C_3 | 0.874 6 | 0.049 0 | C_7 | 0.876 6 | 0.048 2 | C_{11} | 0.933 6 | 0.025 9 | C_{15} | 0.901 2 | 0.038 6 |
| C_4 | 0.935 0 | 0.025 4 | C_8 | 0.856 6 | 0.056 1 | C_{12} | 0.912 2 | 0.034 3 | C_{16} | 0.906 6 | 0.036 5 |

4 安家坡小流域水土保持综合效益评价

4.1 评价过程

根据突变级数模糊综合评判原理,利用系统中各突变模型的归一化公式逐步向上进行综合量化运算,其中一级突变指标基础效益(B_1)、经济效益(B_2)按“互补原则”取值,社会效益(B_3)、生态效益(B_4)按“大中取小”原则取值。例如:

表 4 1960—2007 年甘肃定西市安家坡小流域水土保持综合效益一级评价指标的突变值

Table 4 Results of the first catastrophe indicators of benefit of soil and water conservation of Anjiapo small watershed of Dingxi city Gansu province from 1960 to 2007

| 指标 Index | 1960— 1970 | 1971— 1980 | 1981— 1990 | 1991— 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| B_1 | 0.000 0 | 0.593 2 | 0.723 7 | 0.819 5 | 0.901 9 | 0.913 3 | 0.959 9 | 0.985 4 | 0.978 9 | 0.972 5 | 0.956 7 |
| B_2 | 0.000 0 | 0.393 2 | 0.629 7 | 0.824 9 | 0.682 3 | 0.891 9 | 0.853 9 | 0.822 0 | 0.824 6 | 0.792 2 | 0.843 2 |
| B_3 | 0.487 6 | 0.654 7 | 0.868 9 | 0.864 1 | 0.844 1 | 0.842 4 | 0.840 1 | 0.833 4 | 0.826 1 | 0.748 9 | 0.868 2 |
| B_4 | 0.000 0 | 0.276 3 | 0.000 0 | 0.795 9 | 0.846 0 | 0.871 1 | 0.887 8 | 0.931 8 | 0.959 2 | 0.985 1 | 1.000 0 |

由于流域内部水土保持综合效益对当地生态系统的影响,往往表现在保水保土基础效益(B_1)、经济效益(B_2)、生态效益(B_3)、社会效益(B_4) 4 个方面物质与能量的相互流动,它们之间相互影响、相互制约,构成一个集地理、经济、社会于一体的小流域

对于矩阵 \mathbf{R} 中某个指标 r_j , 其信息熵 E_j 为:

$$E_j = -\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}。(j=1, \dots, n)。(12)$$

$$\text{式中: } p_{ij} = d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij}。(13)$$

第 j 个指标的熵值 e_j 为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} (\ln p_{ij})。(j=1, \dots, n)。(14)$$

第 j 个指标的客观权重 θ_j 为:

$$\theta_j = (1 - e_j) / (n - \sum_{i=1}^n e_j)。(j=1, \dots, n)。(15)$$

显而易见, $0 \leq \theta_j \leq 1; \sum_{i=1}^n \theta_j = 1$ 。

由此可得甘肃定西市安家坡小流域水土保持综合效益评价指标的权重值如表 3 所示。

$x2006B_1 = (xC_3^{1/2} + xC_4^{1/3} + xC_1^{1/4} + xC_2^{1/5})/4 = (0.833 8^{1/2} + 0.948 3^{1/3} + 1.000 0^{1/4} + 0.972 7^{1/5})/4 = 0.972 5$ (C_1, C_2, C_3, C_4 构成蝴蝶突变模型)。

$x2006B_4 = xC_{13}^{1/2} + xC_{15}^{1/3} + xC_{16}^{1/4} + xC_{14}^{1/5} = \min(1.000 0^{1/2}, 0.956 2^{1/3}, 0.975 4^{1/4}, 0.953 0^{1/5}) = 0.985 1$ ($C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}$ 构成蝴蝶突变模型)。

以此类推,从而可以得到一级突变指标的突变值如表 4 所示。

生态巨系统。同理,对 B_1, B_2, B_3, B_4 构成的蝴蝶突变模型,由归一公式逐步向上进行综合量化运算,最后归为一个参数,即最高层的总突变隶属函数值,并在评价时段(年份)的最后评价中,按最终计算值的大小进行重要性排序。例如:

$$X_{\text{目标值}2006} = (xB_1^{1/2} + xB_2^{1/3} + xB_3^{1/4} + xB_4^{1/5}) / 4 = (0.985 \cdot 1^{1/2} + 0.792 \cdot 2^{1/3} + 0.748 \cdot 9^{1/4} + 0.972 \cdot 5^{1/5}) / 4 = 0.9606。$$

同理,可对其他年份的总突变隶属函数值进行归一化计算,其结果见表 5。

表 5 1960—2007 年甘肃定西市安家坡小流域水土保持综合持效益的总突变隶属函数值

Table 5 The results of the total catastrophe indicators of benefit of soil and water conservation of Anjiapo small watershed of Dingxi city Gansu province from 1960 to 2007

| 指标 Index | 1960—1970 | 1971—1980 | 1981—1990 | 1991—2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 总值 Value | 0.3396 | 0.7646 | 0.8012 | 0.9388 | 0.9346 | 0.9590 | 0.9600 | 0.9636 | 0.9666 | 0.9606 | 0.9753 |
| 重要性排序 Order | 11 | 10 | 9 | 7 | 8 | 6 | 5 | 3 | 2 | 4 | 1 |

4.2 评价结果与分析

4.2.1 基础效益 经过多年的水土保持植物措施与工程措施治理,甘肃定西市安家坡流域土壤侵蚀模数已由 20 世纪 60 年代的 690.7 t/(km²·年)下降到目前的 800 t/(km²·年)左右。由于大面积的退耕还林还草、兴修水平梯田,大大提高了该流域的

水土流失总治理面积的比例,减沙效益和农田降水利用率均有明显提高。由图 1 可见,整个流域的基础效益表现为 1960—1970 年直线上升,20 世纪 70 年代末至 2002 年缓慢上升,2003 年后系统一直保持平稳发展,其中于 2004 年达到最优值。

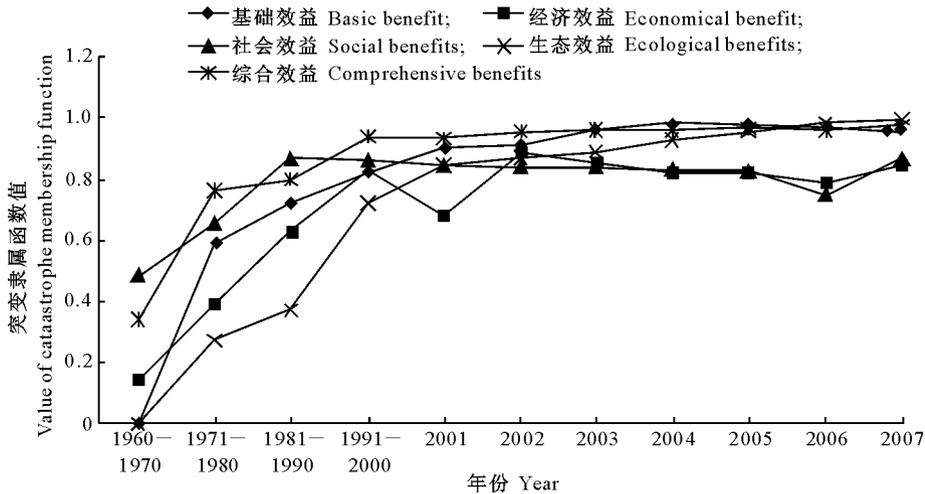


图 1 1960—2007 年甘肃定西市安家坡小流域水土保持综合效益评价与分析

Fig. 1 Analysis of benefit of soil and water conservation of Anjiapo small watershed of Dingxi city Gansu province from 1960 to 2007

4.2.2 经济效益 图 1 显示,20 世纪 60 年代到 90 年代,甘肃定西市安家坡流域经济效益突变值呈直线上升,2001 年流域经济效益突变值有所下降,后又上升至 2002 年出现最高值,2002—2006 年又逐渐降低,2006—2007 年又趋于上升。通过原始数据分析可知,畜牧业、蔬菜和林果业收入主要拉动了该系统的经济效益,工副业贡献率和粮食单产仍然是制约该流域经济效益进一步发展的瓶颈。

4.2.3 社会效益 平均人口密度和恩格尔系数的大小对安家坡流域居民生活水平和日常消费结构的影响较大。我国的恩格尔系数于 2000 年首次低于 50%,而安家坡流域的恩格尔系数于 2005 年首次低

于 50%,为 46.25%,居民食物支出在总支出中所占比例较大^[13]。人口密度远远高于甘肃省 57 人/km²的标准,故流域社会效益值受不断增长的人口压力的影响较大。由图 1 可知,安家坡流域社会效益在 20 世纪 60—80 年代直线上升,之后一直呈平稳发展态势,由于先后实施了 4 次大规模的水土保持措施,居民的生活水平及消费观念有了很大提高,取得了显著的社会效益。

4.2.4 生态效益 甘肃定西市安家坡小流域自 20 世纪 50 年代开始治理以来,流域生态环境已有了较为明显的改善。由图 1 可见,安家坡小流域的生态效益在 20 世纪 60—90 年代增长很快,然后持续上

升,直到2007年达到最优值。由定西市水土保持科学研究所野外原始调查资料可知,该流域20世纪60年代的林草覆盖率为21.8%,到2007年已上升至40%。

4.2.5 水土保持综合效益 在20世纪60—90年代,定西市安家坡小流域水土保持综合效益有2个明显的增长期,其中60—70年代为第一阶段的快速直线增长期,在中国科学院黄河中游水土保持综合考察队的主持下,甘肃省定西市安家坡流域水土保持土地合理利用规划项目于1957—1962年全面展开,全部工程措施总计培地埂424 557 m,修水簸箕1 509个,挖水窖34个,挖涝池42个,封沟埂460 m,退耕203.87 hm²,耕地种草46.65 hm²,造林229.26 hm²,其中包括水土保持分水梁防风林、梁崩坡防冲林、沟谷防冲林和果园;同时推广玉米垄互变耕作、马铃薯垄作区田耕作和糜、谷、荞麦、莜麦等“水平犁沟”耕作技术,取得了较好的生态、经济和社会效益;1980—2000年为缓慢增长期,该期为流域水土流失综合治理工程的继续实施阶段。1982—1988年,在定西市水土保持科学研究所的主持下,顺利完成了安家沟小流域水土保持综合治理试验项目,主要治理措施为梯田、四旁乔木林(新疆杨、河北杨、榆树、杏树等)、果园(巴梨、茄梨、苹果梨)、灌木林(沙棘、柠条、怪柳)、水窖、涝池、谷坊等。从2000—2007年,定西市安家坡小流域水土保持综合效益一直保持稳定,小流域生态经济环境步入了良性循环状态。

5 结 论

本研究中,甘肃省定西市安家坡小流域水土保持综合效益系统中各评价指标的重要性排序为生态效益>经济效益>社会效益>基础效益。以上数据分析显示,安家坡流域经过1957—1962、1982—1988、2001—2005、2005—2007年4个阶段的水土流失治理,其水土保持综合效益评价的大多数指标均随时间呈波动式上升趋势,说明该小流域的生态环境在逐步好转,并呈良性循环态势。

本研究首次运用突变级数法对具体流域的水土保持综合效益进行了评价,在评价多目标决策系统问题的优劣时,只考虑指标的相对重要性,避免了直接使用难于确定且主观性较大的“权重”,因而显得较为简单和方便。实例评价过程表明,突变级数法是合理、客观而可行的,其为解决半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土保持综合效益多目标评价问题提供

了一种新思路。

[参考文献]

- [1] 戴全厚,刘国彬,王跃邦,等.黑牛河小流域生态经济系统健康诊断方法探索[J].中国水土保持科学,2006,4(1):27-34.
Dai Q H, Liu G B, Wang Y B, et al. Approach to health diagnoses of eco-economy system in small watershed of Heiniuhe [J]. Science of Soil and Water, 2006, 4(1): 27-34. (in Chinese)
- [2] 林积泉,王伯铎,马俊杰,等.小流域治理环境质量综合评价指标体系研究[J].水土保持研究,2005,12(1):68-71.
Lin J Q, Wang B D, Ma J J, et al. Study on environmental quality evaluation index system to small watershed management [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 68-71. (in Chinese)
- [3] 黎锁平.水土保持综合治理效益的灰色系统评价[J].水土保持通报,1994,14(5):13-18.
Li S P. Evaluation of the gray system of comprehensive control effectiveness for soil and water conservation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1994, 14(5): 13-18. (in Chinese)
- [4] 李艳,陈晓宏,张鹏飞.突变级数法在区域生态系统健康评价中的应用[J].中国人口:资源与环境,2007,17(3):50-54.
Li Y, Chen X H, Zhang P F. Application of catastrophe progression method to evaluation of regional ecosystem health [J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(3): 50-54. (in Chinese)
- [5] 黄奕龙.突变级数法在水资源持续利用评价中的应用[J].干旱环境监测,2001,15(3):167-170.
Huang Y L. Application of catastrophe progression method to evaluation of sustainable usage of water resource [J]. Arid Environmental Monitoring, 2001, 15(3): 167-170. (in Chinese)
- [6] 周绍江.突变理论在环境影响评价中的应用[J].人民长江,2003,34(2):52-54.
Zhou S J. Application of catastrophe theory to evaluation of environment effects [J]. Yangtze River, 2003, 34(2): 52-54. (in Chinese)
- [7] 李宏文.突变评价法在生态城市评价中的应用[J].环境评价,2004,24(9):44-48.
Li H W. Application of catastrophe theory to the ecological assessment of cities [J]. Environmental Assessment, 2004, 24(9): 44-48. (in Chinese)
- [8] 李岩,王立群.小流域综合治理及其效益评价研究进展[J].北京林业大学学报:社会科学版,2008,7(3):62-66.
Li Y, Wang L Q. Research progress of comprehensive management in small watershed and its benefit evaluation [J]. Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences Edition, 2008, 7(3): 62-66. (in Chinese)
- [9] 袁爱萍.小流域综合治理环境效益分析方法探讨[J].水土保持研究,2001,8(4):165-169.
Yuan A P. Discussion on method of environmental benefit analysis of comprehensive control in small watershed [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2001, 8(4): 165-169. (in Chinese)

- [10] 魏 强,柴春山.半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土流失治理综合效益评价指标体系与方法 [J].水土保持研究,2007,14(2):87-89.
Wei Q,Chai C S. Index system and method on comprehensive effects evaluation of small basin water-soil loss control in semiarid loess hill-valley areas [J]. Research of Soil and Water Conservation,2007,14(2):87-89. (in Chinese)
- [11] 谢花林,李 波,刘黎明.基于压力-状态-响应模型的农业生态系统健康评价方法 [J].农业现代化研究,2005,26(5):366-369.
Xie H L,Li B,Liu L M. Assesment method of agroecosystem health of based on pressure-state-response model [J]. Research of Agricultural Modernization,2005,26(5):366-369. (in Chinese)
- [12] 张瑞君,邸 利,黄海霞,等.定西市安家沟小流域生态经济系统健康定量评价 [J].甘肃农业大学学报,2009,44(1):132-139.
Zhang R J,Di L,Huang H X,et al. Quantitative evaluation of eco-economic system health in the small watershed of Anjiagou in Dingxi City [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2009,44(1):132-137. (in Chinese)
- [13] 林 斌,邸 利,张 富,等.黄土丘陵小流域生态系统健康评价指标体系研究 [J].干旱区资源与环境,2010,24(5):31-36.
Lin B,Di L,Zhang F,et al. Study on indicator system of ecosystem health evaluation for the hilly-gully region of loess plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,24(5):31-36. (in Chinese)
- [14] 梁会民,赵 军.小流域综合治理的生态经济效益评估研究 [J].生态经济,2001,12(8):12-14.
Liang H M,Zhao J. Study on benefit evaluation of eco-economic small drainage basin comprehensive control [J]. Ecological Economy,2001,12(8):12-14. (in Chinese)
- [15] 肖风劲,欧阳华.生态系统健康及其评价指标和方法 [J].自然资源学报,2002,17(2):203-209.
Xiao F J,Ouyang H. Ecosystem health and its evolution indicator and method [J]. Journal of Natural Resources,2002,17(2):203-209. (in Chinese)
- [16] 罗跃初,周忠轩,孙 轶,等.流域生态系统健康评价方法 [J].生态学报,2003,23(8):1606-1614.
Luo Y C,Zhou Z X,Sun Y,et al. Health evaluation of river ecosystem [J]. Journal of Ecology,2003,23(8):1606-1614. (in Chinese)
- [17] 彭鸿嘉,莫保儒,蔡国军,等.甘肃中部黄土丘陵沟壑区农林复合生态系统综合效益评价 [J].干旱区地理,2004,27(3):367-372.
Peng H J,Mo B R,Cai G J,et al. Evaluation on the synthetic benefits of the agro-forest compound eco-system in the loess hilly-ravine region in the central part of Gansu province [J]. Arid Land Geography,2004,27(3):367-372. (in Chinese)
- [18] 符保龙,韦文惠,陈如云.基于熵权的模糊综合分析法在空气质量评价中的应用 [J].柳州职业技术学院学报,2007,7(2):83-86.
Fu B L,Wei W H,Chen R Y. The application of the fuzzy comprehensive analysis based on the entropy to the air quality evaluation [J]. Journal of Liuzhou Vocational & Technical College,2007,7(2):83-86. (in Chinese)

(上接第 170 页)

- [13] 孙元敏,张继林,郭绍铮,等.氮磷钾配合施用对小麦养分吸收和产量的影响 [J].江苏农业科技,1993(2):1-4.
Sun Y M,Zhang J L,Guo S Z,et al. Effects of N,P,K fertilization on nutrients uptake and grain yield of wheat [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,1993(2):1-4. (in Chinese)
- [14] 谭金芳.作物施肥原理与技术 [M].北京:中国农业大学出版社,2002:199-205.
Tan J F. Principle and technology of some crop's fertilization [M]. Beijing:China Agricultural University Press,2002:199-205. (in Chinese)
- [15] 赵 营.冬小麦-夏玉米轮作体系下作物养分吸收利用与累积规律及优化施肥 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
Zhao Y. Nutrients uptake,utilization,accumulation,and optimize fertilization under the winter wheat-summer maize rotation system [D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2006. (in Chinese)
- [16] 中国农业科学院土壤肥料研究所.中国肥料 [M].上海:上海科学技术出版社,1994:451-464.
Soil and Fertilizer Institute,Chinese Academy of Agricultural Sciences. Fertilizers in China [M]. Shanghai:Shanghai Scientific and Technical Publishers,1994:451-464. (in Chinese)